

論文 間詰部を設けた取替RC床版の耐疲労性の検証に関する実験研究

高橋 明彦*1・阿部 忠*2・小野 晃良*3・大西 弘志*4

要旨：本研究では、地方公共団体が管理する老朽化した RC 床版の取替床版として間詰部を設けた構造を提案した。取替 RC 床版間詰部は、鉄筋端部に円形突起を有する鉄筋を配置し、早強コンクリートで一体化した。実験は輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性を評価した。その結果、同一条件で製作した RC 床版供試体に対して間詰部を設けた取替 RC 床版供試体は 12.07 倍の等価走行回数が得られた。輪荷重たわみは、打ち継ぎ部の鉄筋が重ね継手構造化していることから、曲げ剛性が向上し、たわみの増加が抑制された。よって、地方公共団体が管理する道路橋床版の取替床版としては実用性が得られた。

キーワード：RC 床版、取替床版、輪荷重走行疲労実験、耐疲労性

1. はじめに

地方公共団体では、道路橋の老朽化対策として、橋梁定期点検要領¹⁾に基づいて橋梁点検を実施し、部材ごとに損傷度の判定および健全度の判定を行い、損傷が軽微な段階で修繕を行う「道路橋長寿命化修繕計画（以下、長寿命化修繕計画とする）」¹⁾に基づいて修繕が実施され、5 年毎に点検と長寿命化修繕計画に基づく対策が実施されている。したがって、損傷の著しい橋梁および床版においては、小規模から大規模な修繕が実施されたものの、再劣化に至っている床版も多く、その対策として取替床版が提案されている。しかし、長寿命化修繕計画において、RC 床版の損傷や老朽化の対策として補修や補強は施されているものの、取替床版については、長期の通行止めなどの交通規制が必要となることから、施工事例が少ないのが現状である。しかし、補修・補強後の再劣化した床版や現行示方書規定する床版厚と差異が生じる床版においては、補修・補強法も必要であるが、橋梁床版の長寿命化およびライフサイクルコスト（LCC）の低減を図るためにも取替床版の開発が急務となっている。取替床版およびその施工法について各研究機関や各企業では、それぞれのプレキャスト化した取替床版が提案され、実用化されている^{2), 3), 4)}。これらのプレキャスト化した床版はプレストレストコンクリート（PC）構造であることから、LCC の低減を図るために、大型車両の交通量が少ない路線に架橋するための RC 構造とした取替 RC 床版が必要となる。

そこで本研究では、地方公共団体が管理する道路橋 RC 床版、すなわち交通量は少ないものの塩害や凍害を受け、床版上面は土砂化より撤去を余儀なくされた床版を対象に、RC 構造とした取替 RC 床版を提案した。プ

レキャスト版に用いる主筋の端部には三角形、配力筋には円形の 2 種類の突起を設けた鉄筋を配置した継手構造を提案した。よって、継手構造である間詰部を床版中央の軸直角方向に設けた取替 RC 床版供試体を用いて、輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性を評価し、地方公共団体が管理する取替 RC 床版の実用性を検証する。

2. 既往の取替床版および本稿で提案する取替床版

2.1 既往の取替床版構造

老朽化した RC 床版に対する取替床版は、各企業や研究機関で研究・開発が進められ、各種取替床版が提案されている。例えば、主筋方向に PC 材、配力筋方向には鉄筋とし、橋桁上に並列した後、間詰部にコンクリートを打ち込み、一体化されている。間詰部の鉄筋配置をループ継手構造²⁾とし、配力筋の先端にネジを設けて付着性を高めた合理化継手構造³⁾とした取替 PC 床版などが提案されている。ループ継手を用いた取替床版の間詰間隔は 330mm、合理化継手構造の場合は 280mm である。一方、PC 構造としたプレキャスト版を並列する方法として、左右の床版にコンクリート接合キーを有した縦目地部を接着剤で接合し、ポストテンション方式により、一体化する PC 床版も提案され実橋で採用されている⁴⁾。

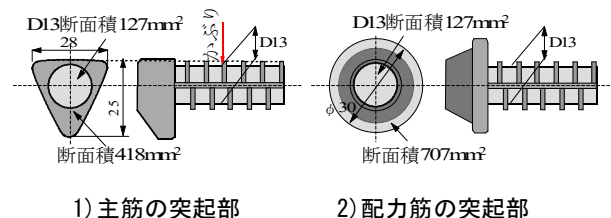


図-1 取替RC床版の突起形状

*1 岩手大学大学院 工学研究科機械・社会環境システム工学専攻（正会員）

*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博士（工学）（正会員）

*3 （株）小野工業所

*4 岩手大学 理工学部社会基盤・環境コース 准教授 博士（工学）（正会員）

表－1 RC床版、取替RC床版コンクリートの配合条件

供試体名称	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 kg/m ³	流動化剤 kg/m ³	AE剤 kg/m ³
				セメント	水	細骨材	粗骨材			
RC-A	10±2.5	54.0	47.1	341(普)	184	804	948	3.41	—	3.41
RC-B	10±2.5	35.0	43.2	443(普)	155	732	968	4.43	—	4.43
取替RC 床版	床版部	10±2.5	35.0	443(普)	155	732	968	4.43	—	4.43
	間詰部	8±2.5	32.9	40	450(超)	148	710	1157	9.0	—

これらの取替床版の特徴としては、間詰部の構造が特徴であり、いずれも耐疲労性が評価されている。

2.2 本稿で提案する取替RC床版構造

取替 RC 床版は、地方公共団体が管理する道路橋を対象とした床版であり、従来の取替 PC 床版工法と同様にプレキャスト版を工場で製作し、現地で橋軸方向に並列しながら一体化するものである。橋軸方向に並列することで間詰部が生じることから、付着力を確保するための継手構造が必要となる。ここで、取替 RC 床版に用いる主筋の突起形状は図－1(1)に示すように、かぶりを確保するために三角形状とした。供試体の鉄筋には D13 を配置することから底辺幅が 28mm、高さ 25mm である。付着面積は 277mm² であり、異形鉄筋と併せて付着力確保するものである。また、配力筋は主筋の内側に配置されることから突起形状は図－1(2)に示すように、D13 に対してφ 30mm の円形とし、付着面積は 580mm² である。なお、本実験供試体の間詰部の寸法は、軸方向間詰部幅は 300mm とし、道路橋示方書・同解説⁵⁾（以後、道示と示す）の規定を考慮し、継手長を 280mm とした。

3. 供試体の使用材料・寸法

3.1 使用材料

(1) RC床版供試体

RC 床版供試体のコンクリートには、普通セメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm ～ 20mm の砕石を使用した。RC 床版供試体のコンクリートの設計基準強度は道示に規定する 24N/mm² および取替床版の要求性能であるコンクリートの圧縮強度 40N/mm² を目標とした 2 種類の配合条件とし、供試体名称はそれぞれ RC-A、RC-B とする。ここで、本実験に用いる RC 床版コンクリートの配合条件を表－1に示す。次に、供試体の鉄筋には SD 345、D13 を用いた。コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表－2に示す。表－2より、供試体 RC-A の材齢 28 日の圧縮強度は 30.3N/mm²、供試体 RC-B の圧縮強度は 49.6N/mm² である。鉄筋の降伏強度は 355N/mm² である。

(2) 取替RC床版供試体

取替 RC 床版供試体に用いる材料は、プレキャスト RC 床版部については RC 床版供試体と同様とする。取替 RC 床版の要求性能は、コンクリートの圧縮強度を 40N/mm²

表－2 材料特性値

供試体名称	圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD345 D13)		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
RC-A	30.3(材齢28日)	355	498	200
RC-B	49.6(材齢28日)	355	498	200
取替RC 床版	床版部	56.4(材齢28日)	366	539
	間詰部	48.3(材齢14日)		

を目標とする。これは、阿部ら⁶⁾の研究による圧縮強度を高めることで耐疲労性が大幅に向上する結果が得られていることから、圧縮強度 40N/mm² を目標とする配合条件とした。よって、RC 床版同様に、普通セメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm ～ 20mm の砕石を使用した。配合条件を表－1に併記した。

次に、間詰部のコンクリートには、現場での施工時間を 8 時間以内として、要求性能は材齢 3 時間で道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm² 以上、材齢 14 日で 40N/mm² 以上確保できる配合とする。よって、コンクリートには超速硬セメントに 5mm 以下の砕砂および 5mm ～ 20mm の砕石を用いた。配合条件を表－1に併記した。また、鉄筋はプレキャスト RC 床版部と同様に SD 345、D13 を用いる。ここで、材齢 28 日のコンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表－2に併記する。表－2より、プレキャスト部の材齢 28 日のコンクリートの圧縮強度は 56.4N/mm² である。なお、同一状況で配合した供試体 RC-B の圧縮強度との差異は、製作時期や製作工場の違いによるものと考えられるが、要求性能である 40N/mm² 以上は確保されている。次に、間詰部のコンクリートの発現強度は、材齢 3 時間で 34.9N/mm²、材齢 14 日は 48.3N/mm² である。よって、打設 3 時間後に強度が 24N/mm² 以上であり、並列後の施工の省力化が図られる材料である。

3.2 供試体寸法および鉄筋配置

供試体 RC-A、B および取替 RC 床版は、1994 年改定の道示に準拠し、その 3/5 モデルとする。本供試体は、実験装置の車輪幅が 300mm であり、道示に規定する輪荷重幅 500mm に対して 3/5 モデルであることから、実験供試体も 3/5 モデルとした。なお、取替 RC 床版供試体の間詰部の寸法は、使用鉄筋の付着長 280mm を考慮して 300mm とした。ここで、RC 床版供試体および取替 RC 床版の寸法を図－2に示す。また、取替 RC 床版

表－3 実験・等価走行回数および等価走行回数比

供試体	実験走行回数および等価走行回数					合計等価走行回数	等価走行回数比	
	荷重	100kN	120kN	140kN	150kN			
RC-A	実験走行回数	40000	14000			54,000	—	0.54
	等価走行回数	2,593,806	919,617			11,789,979		
RC-B	実験走行回数	40000	29500			69,500	1.86	—
	等価走行回数	2,593,806	19,377,651			21,971,457		
取替RC床版-1	実験走行回数	40000	40000	40000	4501	124,501	22.50	12.07
	等価走行回数	2,593,806	26,274,781	186,107,271	50,297,372	265,273,230		
取替RC床版-2	実験走行回数	40000	40000	40000	5130	125,130	23.10	12.39
	等価走行回数	2,593,805	26,274,781	186,107,271	57,326,265	272,302,122		

値には松井らが提案する 12.7 を適用する⁷⁾。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times n_i \quad (1)$$

ただし、 P_i ：載荷荷重 (kN)， P ：基準荷重 (=72kN)， n_i ：実験走行回数(回)， m ：S-N 曲線の傾きの逆数(=12.7)⁷⁾

5. 結果および考察

5.1 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験における等価走行回数 N_{eq} および RC 床版供試体との等価走行回数比を表－3に示す。なお、取替 RC 床版は 2 体製作したことから供試体名称を取替 RC 床版-1 および取替 RC 床版-2 とする。また、等価走行回数比は RC 床版供試体 RC-A および RC-B を基準にそれぞれの比を表－3に示した。

(1) RC床版供試体

コンクリートの圧縮強度が 30.3N/mm² の供試体 RC-A の実験走行回数 n_i は 54,000 回、式(1)より算定した等価走行回数 N_{eq} は 11.789×10⁶ 回である。これに対してコンクリートの圧縮強度 49.6N/mm² の供試体 RC-B の実験走行回数 n_i は 69,500 回、式(1)より算定した等価走行回数 N_{eq} は 21.971×10⁶ 回である。圧縮強度 30.3N/mm² の供試体 RC-A の 1.86 倍となる。よって、圧縮強度を高くすることで耐疲労性が向上する結果が得られた。この 2 タイプの RC 床版供試体の等価走行回数を基準に取替 RC 床版の耐疲労性を検証する。

(2) 取替RC床版供試体

取替 RC 床版-1 は、プレキャスト RC 床版を橋軸方向に並列に並べ、軸直角方向に間詰部を設けた床版であり、RC 床版コンクリートの圧縮強度は、材齢 28 日で 56.4N/mm²、間詰コンクリートの材齢 14 日で圧縮強度が 48.3N/mm² である。実験走行回数 n_i は 124,501 回、式(1)より算定した等価走行回数 N_{eq} は 265.273×10⁶ 回である。圧縮強度 30.3N/mm² の供試体 RC-A の等価走行回数に対して、22.50 倍、圧縮強度 49.6N/mm² の供試体 RC-B の等価走行回数と比較すると 12.07 倍である。また、取替 RC 床版-2 の実験走行回数は 125,130 回、等価走行回数は 272.302×10⁶ 回である。供試体 RC-A、RC-B

のそれぞれ 23.10 倍、12.39 倍である。

取替 RC 床版は、軸方向の床版支間中央に幅 300mm の間詰部を設け、鉄筋の付着長は 280mm である。配力筋の端部には円形の突起を設け、継手部は床版部の 2 倍の鉄筋量となり、さらに間詰部のコンクリートには超速硬セメントを用いたコンクリートを打ち込んだことから間詰部の耐力力が向上し、等価走行回数が向上したものと考えられる。よって、間詰部は弱点とならず取替 RC 床版全体の等価走行回数が向上する結果となった。

5.2 たわみと等価走行回数

たわみと等価走行回数の関係を図－3に示す。なお、図－3には阿部ら⁸⁾が提案する維持管理の目安である床版中央のたわみが、床版支間 L の 1/400、すなわち 3.5mm のたわみも図－3に併記した。

(1) RC床版供試体

供試体 RC-A の荷重とたわみの関係は、図－3に示すように、荷重 100kN で 1 走行後の初期たわみは 1.18mm である。その後の走行によりたわみが徐々に増加し、たわみが床版支間 L の 1/400、すなわち 3.50mm に達した時点の等価走行回数は 2.594×10⁶ 回である。その後の荷重増加と走行を繰り返すことでたわみが増加している。荷重 120kN で 14,000 回走行（等価走行回数 11.789×10⁶ 回）のたわみは 9.60mm である。破壊は押抜きせん断破壊に至った。一方、供試体 RC-B の荷重 100kN で 1 走行後のたわみは 1.09mm であり、供試体 RC-A のたわみを下回っている。その後、荷重を 120kN に増加し、走行を繰り返すことでたわみが徐々に増加し、たわみが 3.50mm に達した時点の等価走行回数は 4.008×10⁶ 回であり、供試体 RC-A の等価走行回数の 1.55 倍である。この付近からたわみの増加がやや大きくなっている。等価走行回数 21.971×10⁶ 回の最大たわみが 10.5mm である。よって、コンクリートの圧縮度が高いことから、耐疲労性が向上する結果が得られた。

(2) 取替RC床版供試体

取替 RC 床版-1 の荷重とたわみの関係は、図－3に示すように、荷重 100kN で 1 走行後のたわみは 0.89mm である。その後の荷重増加と走行によりたわみが徐々に増加している。たわみが 3.50mm に達した時点のたわみ

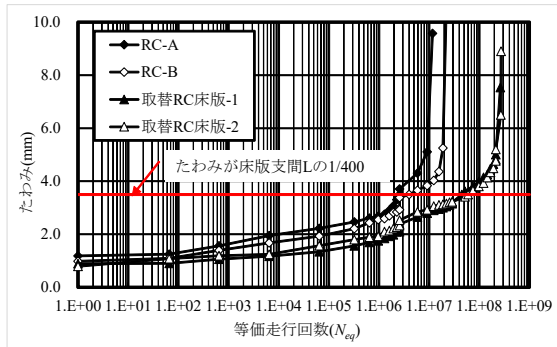


図-3 たわみと等価走行回数

と等価走行回数は 45.100×10^6 回であり、供試体 RC-B の 11.3 倍である。この付近からたわみの増加がやや大きくなっている。等価走行回数 265.273×10^6 回の最大たわみが 7.55mm である。取替 RC 床版-2 の初期たわみは 0.79mm である。たわみが 3.5mm に達した時点の等価走行回数 60.200×10^6 回であり、供試体 RC-B の 15.02 倍である。

以上より、軸直角方向に間詰部を設けた床版中央は、鉄筋量も多く、配力筋の端部に円形の突起を設けたことから付着力も高く、耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。よって、本稿で提案する取替 RC 床版構造における軸直角方向の間詰部は、曲げ剛性が向上することから、弱点とならず耐疲労性が向上する結果が得られた。

5.3 ひずみと等価走行回数

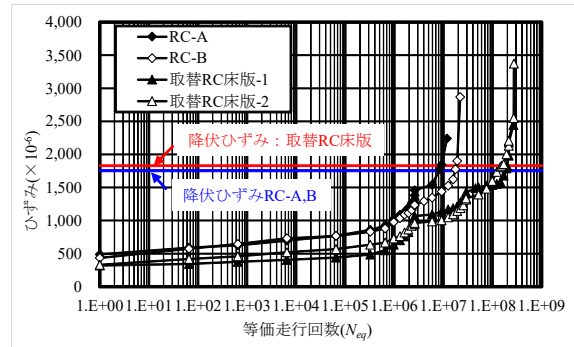
鉄筋のひずみと等価走行回数の関係を図-4に示す。なお、鉄筋の降伏ひずみは供試体 RC-A, B および取替 RC 床版でそれぞれ 1775×10^{-6} , 1830×10^{-6} である。

(1) RC床版供試体

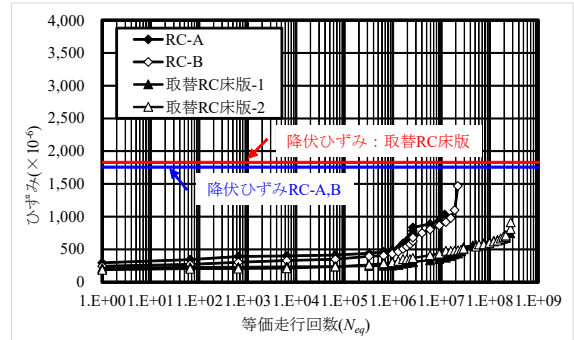
供試体 RC-A の主筋の初期ひずみは図-4(1)に示すように 489×10^{-6} である。降伏ひずみに達した等価走行回数は 8.38×10^6 回である。また、供試体 RC-B の初期ひずみは 432×10^{-6} であり、降伏ひずみに達した等価走行回数は 17.60×10^6 回である。次に、配力筋のひずみは図-4(2)に示すように、供試体 RC-A のひずみは 295×10^{-6} 、その後の走行でひずみは増加するものの降伏ひずみに達していない。供試体 RC-B も同様な増加傾向を示している。初期ひずみは 243×10^{-6} であり、その後の走行でひずみは増加するもの、降伏ひずみに達していない。

(2) 取替RC床版供試体

取替 RC 床版-1 の主筋の初期ひずみは 320×10^{-6} である。降伏ひずみに達した等価走行回数は 196.80×10^6 回である。また、取替 RC 床版-2 の初期ひずみは 330×10^{-6} であり、降伏ひずみに達した等価走行回数は 154.4×10^6 回である。供試体 RC-A の降伏ひずみに達した等価走行回数のそれぞれ、23.48 倍、18.42 倍である。また、供試体 RC-B と比較すると、それぞれ 11.18 倍、8.77 倍であ



(1) 主筋



(2) 配力筋

図-4 ひずみと等価走行回数

る。間詰部は配力筋を 280mm の重ね継手に 3 本の主筋が配置されていることから、曲げ剛性が向上し、ひずみの増加が抑制されている。

次に、取替 RC 床版-1 および-2 の配力筋の初期ひずみは図-4(2)に示すように、それぞれ 214×10^{-6} , 188×10^{-6} である。両供試体ともに走行を繰り返すことでひずみは徐々に増加するが降伏ひずみに達していない。

以上より、主筋のひずみは降伏ひずみに達するものの間詰部の主筋量が多く、圧縮強度が高いことから全体的に剛性が高まり、ひずみの増加が抑制されている。

5.4 損傷状況

RC 床版および取替 RC 床版の損傷状況の一例 (RC-A, 取替 RC 床版-1) を図-5に示す。なお、走行範囲を青枠、間詰部を赤枠で図-5に示した。また、輪荷重走行位置が 45 度底面の範囲を黄色の破線で示した。

(1) RC床版供試体

RC 床版供試体 RC-A の下面のひび割れ状況は図-5(1)に示すように、破壊後の床版下面には疲労による 2 方向のひび割れが発生している。また、輪荷重走行により、走行端部 300mm 付近を始点に、輪荷重折り返し位置まで、輪荷重の接地面から 45 度底面にダウエル効果の影響によるはく離が見られる。よって、ダウエル効果の影響によるはく離が発生する位置は輪荷重走行端部から 300mm 付近を始点に、輪荷重の折り返し位置の 45 度分布範囲である。したがって、ダウエル効果の影響が

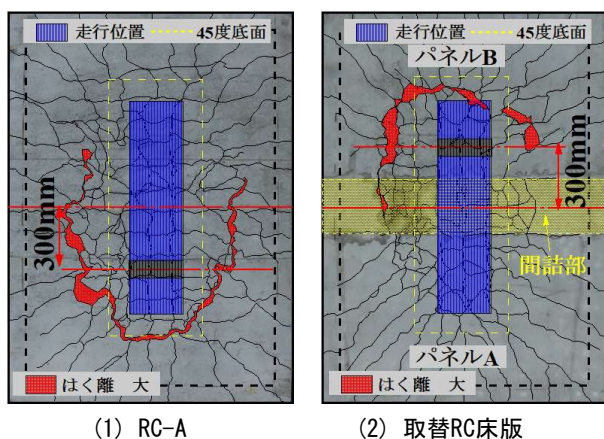


図-5 下面の損傷状況

見られる付近の走行から、押抜きせん断破壊へと移行し、輪荷重が図-5(1)に示す床版中央から 300mm の位置で走行不能となる押抜きせん断破壊に至った。また、RC 床版供試体 RC-B においても輪荷重が走行中に床版中央から 360mm 付近で押抜きせん断破壊となった。

(2) 取替RC床版供試体

取替 RC 床版-1 のひび割れ状況は図-5(2)に示すように、軸直角方向は幅 1000mm、軸方向は輪荷重の走行範囲に 2 方向のひび割れが発生し、その外側には 1 方向のひび割れが発生している。また、間詰部からパネル B の下面には、ダウエル効果の影響によるはく離が分布している。よって、輪荷重走行によるダウエル効果の影響を受け、はく離した位置を始点に押抜きせん断破壊へと移行され、輪荷重が走行中に床版支間中央から 300mm 走行した位置で、押抜きせん断破壊となった。この供試体は、軸直角方向に幅 300mm の範囲の間詰部を設けたが、配力筋方向の鉄筋端部に円形の突起を設けたことから、付着力の低下に伴う損傷が見られない。また、間詰部は鉄筋がダブルで配置することから、ダウエル効果を受ける範囲の外側にはひびわれの発生は見られない。なお、破壊時には鉄筋の破断は見られない。取替 RC 床版-2 の供試体においても輪荷重が走行中に床版中央からパネル A 側の 300mm 付近で押抜きせん断破壊となった。

7. まとめ

近年、RC 床版の老朽化や設計基準の変遷に伴い、現行示方書の規定を満足したプレキャスト床版へと取替されている。そこで、鉄筋端部に 2 タイプの突起を設けた継手部を有する取替 RC 床版を提案し、耐疲労性の検証を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本稿で提案する鉄筋端部に突起を設けた鉄筋を配力筋方向に配置し、間詰部で重ね継手構造とした。実験供試体は施工条件を考慮してパネルを工場で製作した。間詰部を設けた供試体のコンクリートには超

速硬セメントを用いたコンクリートを打ち込み施工した。その結果、本稿で提案する構造は施工性にも優れた取替 RC 床版である。よって、実橋においても、同様の配合条件および施工条件での実施が可能である。

- (2) 輪荷重走行疲労実験におけるプレキャスト化した取替 RC 床版において、軸直角方向に間詰部を設けた取替 RC 床版供試体の等価走行回数は、同一条件で配合したコンクリートで製作した RC 床版供試体 RC-B に対して、12.1 倍の等価走行回数を得られた。
- (3) RC 床版および取替 RC 床版の軸方向の支間中央のたわみと等価走行回数においては、取替 RC 床版の間詰部は鉄筋の付着を考慮し、280mm の継手長とし、先端部にそれぞれの突起を設けたことから、間詰部の剛性が高まり、輪荷重走行によるたわみの増加が抑制され耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。
- (4) 輪荷重走行疲労実験における破壊状況は、RC 床版および取替 RC 床版ともに、輪荷重の走行による 2 方向のひび割れが発生し、輪荷重 45 度底面の外側にはダウエル効果によるはく離が発生し、破壊は押抜きせん断破壊となった。間詰部を設けた 2 体の供試体ともに破壊はプレキャスト化した RC 床版部で破壊に至ることから、間詰部を設けた 2 体ともに破壊はプレキャスト版で破壊に至ることから、間詰部は弱点とならず、耐疲労性が向上する結果が得られた。

参考文献

- 1) 国土交通省：橋梁定期点検要領，2014.6
- 2) 中村定明，三浦尚：RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.774/V-65，pp.17-26，2004.11
- 3) 水野浩ほか：床版取替用プレキャスト合成床版の合理化継手の疲労耐久性評価，構造工学論文集 Vol.58A，pp.1112-1122，2012.3
- 4) 大柳修一，大林敦裕：既設床版の半断面床版取替工法の開発（輪荷重疲労載荷試験），ピーエス三菱技報，第 13 号，2015
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, III, 2012.3
- 6) 阿部忠，木田哲量，水口和彦，川井豊：輪荷重走行疲労実験における車輪寸法が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響および評価法，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1305-1315，2011.3
- 7) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007.10
- 8) 阿部忠ほか：輪荷重走行疲労実験における RC 床版上面増厚補強法の耐疲労性の評価法，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1270-1281，2010.3